

УДК 621.791.722:669  
О-75

## ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ З'ЄДНАНЬ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ Ti-Si-X З ДИСПЕРСІЙНИМ ЗМІЦНЕННЯМ, ВИКОНАНИХ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИМ ЗВАРЮВАННЯМ

Т. Г. Таранова, канд. техн. наук<sup>1</sup>;  
А. Ю. Туник, канд. техн. наук<sup>1</sup>;  
С. В. Ахонін, д-р техн. наук<sup>1</sup>;  
С. Г. Григоренко, канд. техн. наук<sup>1</sup>;  
Л. М. Капітанчук, наук. співроб.<sup>1</sup>;  
О. М. Задорожнюк, мол. наук. співроб.<sup>1</sup>;  
В. О. Туник, магістр<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України, м. Київ;

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ

**Анотація.** Наведено результати дослідження особливостей формування структурно-хімічної неоднорідності, фазового складу та механічні властивості зварних з'єднань титанових сплавів Ti-Si-X з інтерметалічним зміцненням, отриманих методом електронно-променевого зварювання. Проаналізовано характер розподілу зміцнюючих частинок у різних зонах зварного з'єднання. Установлено, що зміцнюючі фази — складні силіциди системи Ti-Al-Zr-Si, які когерентні з матрицею і значно підвищують механічні властивості.

**Ключові слова:** титанові сплави, легуючі елементи, структура, фазовий склад, термічна обробка, механічні властивості.

**Аннотация.** Представлены результаты исследования особенностей формирования структурно-химической неоднородности, фазового состава и механические свойства сварных соединений титановых сплавов Ti-Si-X с интерметаллидным упрочнением, полученных методом электронно-лучевой сварки. Проанализирован характер распределения упрочняющих частиц в различных зонах сварного соединения. Установлено, что упрочняющие фаза — сложные силициды системы Ti-Al-Zr-Si, которые когерентны с матрицей и значительно повышают механические свойства.

**Ключевые слова:** титановые сплавы, легирующие элементы, структура, фазовый состав, термическая обработка, механические свойства.

**Abstract.** The results of the research of the forming features of the structural and chemical heterogeneity, the phase composition and the mechanical properties of the welded Ti-Si-X titanium alloys joints with the intermetallic strengthening have been represented. These joints were obtained via the electron beam welding. The distribution nature of strengthening particles in different zones of the welded joints has been analyzed. It has been established that the strengthening phases are the complex silicides of the Ti-Al-Zr-Si system which are coherent with the matrix and increase the mechanical properties significantly.

**Keywords:** titanium alloys, alloying elements, structure, phase composition, heat treatment, mechanical properties.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Титанові сплави завдяки унікальному поєднанню фізичних і механічних характеристик є одними з найбільш перспективних конструкційних матеріалів, особливо для авіації, космосу, хімічної промисловості та медицини. Безперервне розширення виробництва та застосування титану в різних галузях техніки викликане, перш за все, його підвищеною питомою міцністю (відношення границі міцності до густини). Відмінна корозійна стійкість титану в атмосферних умовах, морській воді та інших середовищах обумовлює його ефективно використання для виготовлення різноманітних конструкцій. У двигунобудуванні, аерокосмічній і авіаційній техніці жароміцні сплави на основі титану є матеріалами, які замінюють традиційні в даних галузях жароміцні сплави

на основі нікелю, кобальту й заліза [3]. Основним напрямком подальшого підвищення експлуатаційних характеристик є створення нових титанових сплавів з дисперсійним зміцненням тугоплавкими сполуками на основі Ti-Si, Ti-Al тощо, але їх широке застосування пов'язане з проблемою зварювання.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Розроблені вітчизняними вченими нові титанові сплави дозволяють значно покращити їх експлуатаційні характеристики, міцність, проте пластичність цих сплавів залишається низькою [4]. Проблемою зварювання титанових сплавів є забезпечення рівних міцності й пластичності основного металу (ОМ) і зварного з'єднання. Відсутність загальнодовизнаних рекомендацій

з проведення пом'якшувальної і зміцнюючої термічної обробки (ЗТО) зварних з'єднань не дозволяє реалізувати всі переваги високолегованих титанових сплавів [2]. Тому *актуальність* даної роботи є очевидною.

**МЕТА РОБОТИ** — встановлення особливостей формування структури з'єднань титанових сплавів системи Ti-Si-X з дисперсійним зміцненням при електронно-променевому зварюванні (ЕПЗ) та впливу термічної обробки на структуру і властивості з'єднань.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

При проведенні даної роботи застосовано наступні методики досліджень зварних з'єднань титанових сплавів:

– металографія — оптичний мікроскоп «Неофот-32» з приставкою для цифрового фотографування QuickPHOTO;

– растрова електронна мікроскопія — скануючий електронний мікроскоп JSM-840;

– мікродюротричний аналіз — мікротвердомір М-400 фірми «ЛЕСО» з навантаженням 0,249 і 0,490 Н;

– рентгеноструктурний фазовий аналіз — дифрактометр ДРОН-УМ1 у монохроматизованому випромінненні  $\text{CuK}\alpha$ ;

– скануюча електронна мікроскопія — оже-мікроскоп з польовим емісійним катодом JAMP-9500F (JEOL Ltd).

Титан — поліморфний метал, який може перебувати у вигляді двох алотропічних модифікацій [1]. Низькотемпературна  $\alpha$ -фаза, стійка до 882,5°C, має

гексагональну щільноупаковану ґратку з параметрами  $a = 0,29511$  нм,  $c = 0,46848$  нм і співвідношенням осей  $c/a = 1,5873$ . Від 882,5°C до температури плавлення існує стабільна високотемпературна  $\beta$ -модифікація титану з об'ємноцентрованою кубічною ґраткою і параметром  $a = 0,3282$  нм.

За впливом на температуру поліморфного перетворення ( $T_{\text{п.п}}$ ) у титанових сплавах легуючі елементи поділяються на  $\alpha$ - і  $\beta$ -стабілізатори. До перших належать алюміній, олово та ін. Вони підвищують  $T_{\text{п.п}}$ , розширюючи  $\alpha$ -область. Інші елементи, такі, як ванадій, молібден, залізо, хром, мідь, марганець, кремній, вольфрам тощо, знижують  $T_{\text{п.п}}$ , розширюючи  $\beta$ -область.

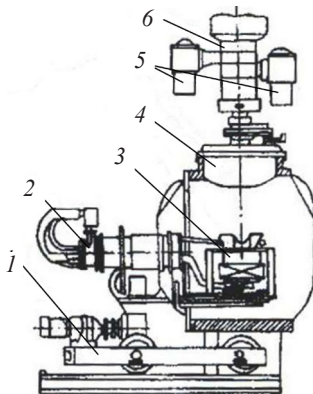
У роботі досліджено особливості формування структури при ЕПЗ жароміцних псевдо- $\alpha$ -,  $\alpha + \beta$ -титанових сплавів з масовим вмістом кремнію 0,35...0,57%. Об'єктами дослідження були зварні з'єднання трьох титанових сплавів. У табл. 1 наведено хімічний склад зразків титанових сплавів.

Усі дослідні плавки проведено в електронно-променевої ливарній установці з електромагнітним перемішуванням, змонтованій на базі стандартної вакуумної індукційної печі ІСВ-004. Метод електронно-променевої плавки дозволяє отримати гомогенний розплав, а після охолодження — однорідні за хімічним складом зливки. Схема установки наведена на рис. 1.

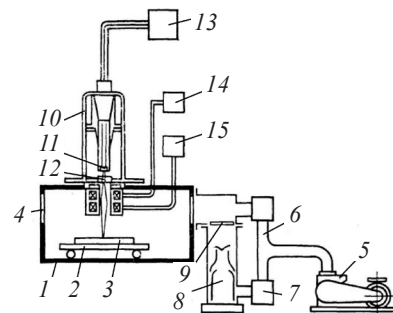
Зварювання зразків виконували на модернізованій установці УЛ-144, яка оснащена джерелом живлення ЕЛА 60/60, зварювальною гарматою ЦФ-19 і приладом керування променем СУ-220 (рис. 2).

**Таблиця 1.** Хімічний склад титанових сплавів системи Ti-Si-X

Номер сплаву	Клас сплаву	Масова частка елементів, %								
		Al	Sn	Zr	Nb	Mo	V	Si	[O]	[N]
1	Псевдо- $\alpha$	5,64	2,21	3,53	—	0,43	0,95	0,56	0,09	0,02
2	Псевдо- $\alpha$	5,22	3,33	4,24	0,57	0,13	0,61	0,57	0,10	0,02
3	( $\alpha + \beta$ )	4,29	4,39	5,95	4,26	1,57	0,68	0,35	0,24	0,02



**Рис. 1.** Схема електронно-променевої установки з електромагнітним перемішуванням на базі вакуумної індукційної печі ІСВ-004: 1 — станіна; 2 — механізм повороту (нахилу) тигля; 3 — гарнісажний тигель із системою електромагнітного перемішування розплаву; 4 — плавильна (вакуумна) камера; 5 — вакуумні насоси; 6 — електронно-променева гармата



**Рис. 2.** Схема електронно-променевої зварювальної установки УЛ-144: 1 — вакуумна камера; 2 — механізм переміщення; 3 — виріб зварюваний; 4 — оглядове вікно; 5 — форвакуумний насос; 6 — вакуумпровід; 7 — вентиль; 8 — високовакуумний насос; 9 — затвор високовакуумного агрегату; 10 — зварювальна гармата; 11 — катод; 12 — анод; 13 — високовольтне джерело живлення; 14 — система фокусування променя; 15 — система електромагнітного відхилення пучка електронів

Зварювання проводили на такому режимі: напруга прискорення — 60 кВт, сила струму променя — 80 мА,  $V=7$  мм/с.

Електронно-променеве зварювання має наступні переваги в порівнянні з іншими способами зварювання плавленням:

1) широкий діапазон товщини зварюваних деталей — від кількох міліметрів до 100 мм і більше;

2) можливість отримання вузьких швів з глибоким проплавленням;

3) зменшення росту зерна в шві та зоні і термічного впливу (ЗТВ);

4) невеликі лінійні розміри ЗТВ;

5) можливість отримувати максимальний ступінь чистоти і високі фізико-механічні властивості з'єднання.

За результатами рентгеноструктурного аналізу встановлено фазовий склад зразків:

– №1 →  $\alpha$ -Ті матриця (параметри ґратки  $a=0,2916$  нм;  $c=0,4668$  нм) та сліди  $\beta$ -фази;

– №2 →  $\alpha$ -Ті матриця (параметри ґратки  $a=0,2926$  нм;  $c=0,4685$ ) та сліди  $\beta$ -фази;

– №3 →  $\alpha$ -Ті — 59,40% мас. ( $a=0,2934$  нм,  $c=0,4690$  нм) +  $\beta$ -Ті — 40,60% мас. (параметри ґратки  $a=0,3262$  нм).

Макро- і мікроструктури зварних швів сплавів №1–3 наведено на рис. 3–5.

Металографічні дослідження показали, що всі зразки були якісними та без дефектів (пор, раковин).

Зварний шов сплаву №1 умовно можна розділити на три ділянки. Верхня частина шва має трапецеїдальну форму висотою 1,5 мм. У ній чітко виражені стовпчасті дендрити, які утворилися при кристалізації перпендикулярно до лінії сплавлення з ОМ. Вони розташовані під кутом  $40...45^\circ$ . Мікроструктура у верхній частині шва складається з мартенситоподібної голчастої  $\alpha'$ -фази, в якій розрізняються границі, що утворені пластинчастими виділеннями  $\alpha$ -фази. Голки мають різне орієнтування. Центральна частина шва має циліндричну форму шириною 3 мм. У ній чітко простежується виділення  $\alpha$ -фази по границях кристалітів шва. Форма кореня шва наближується до більш округлої внаслідок перегріву. У цій ділянці шва в об'ємі зерен зафіксована  $\alpha'$ -фаза, по границях якої спостерігаються виділення  $\alpha$ -фази, однак їхня ширина приблизно в 2 рази менша, ніж у центральній частині. Мікроструктура ЗТВ аналогічна структурі металу шва, відрізняється лише незначним зменшенням розмірів зерен.

Структура шва псевдо- $\alpha$ -титанового сплаву №2 аналогічна сплаву №1, проте розмір зерен менший, а лінія сплавлення виражена нечітко.

Зварний шов  $\alpha+\beta$ -титанового сплаву №3 складається з  $\beta$ -зерен різної форми, їх розмір зменшується від верхньої частини шва до кореня. В їх об'ємі фіксується метастабільна мартенситоподібна  $\alpha'$ -фаза.

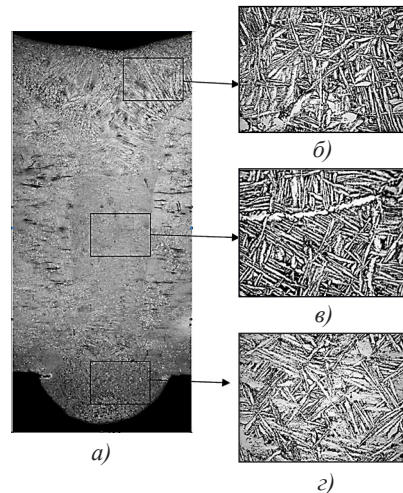


Рис. 3. Макро- ( $a$ ,  $\times 15$ ) та мікроструктури ( $b-d$ ,  $\times 500$ ) зварного з'єднання №1

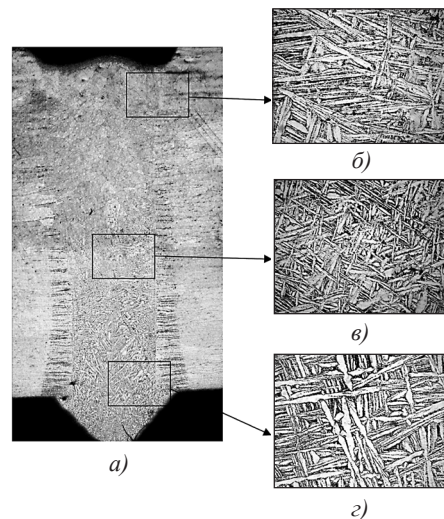


Рис. 4. Макро- ( $a$ ,  $\times 15$ ) та мікроструктури ( $b-d$ ,  $\times 500$ ) зварного з'єднання №2

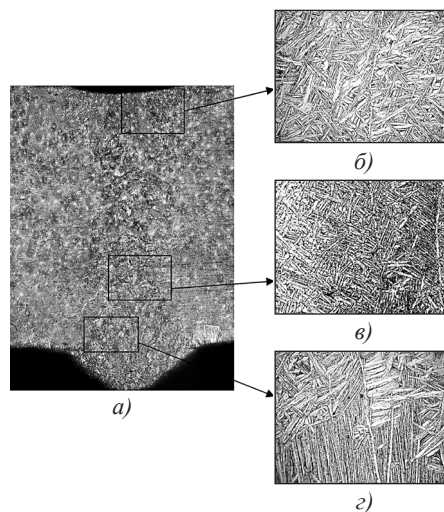


Рис. 5. Макро- ( $a$ ,  $\times 15$ ) та мікроструктури ( $b-d$ ,  $\times 500$ ) зварного з'єднання №3

На фоні голчастої структури спостерігаються дисперсні частинки, що розміщуються як на границях, так і в об'ємі зерна. Пришовна зона сплаву №3 має будову, подібну до зварного шва, і складається з рівновісних  $\beta$ -зерен, в об'ємі яких також фіксується мартенситоподібна метастабільна  $\alpha'$ -фаза. На ділянці ЗТВ, на якому відбувається часткова рекристалізація, утворюються дрібні рівновісні зерна.

З метою усунення негативного впливу зварювання на структуру металу для титанових сплавів проводилася локальна термічна обробка (ЛТО): попередня ЛТО до 200°C → зварювання → ЛТО до 750°C (втримка 10 хв) та охолодження з піччю (для сплаву №1 ЛТО після зварювання не проводилася).

Післязварювальна ЛТО виконувалася у вакуумі шляхом нагрівання електронним променем зони шва та пришовної зони зварних з'єднань (рис. 6).

Локальна термічна обробка підвищує структурну однорідність зварного з'єднання та знижує ймовірність утворення в ньому тріщин.

Дослідження мікротвердості кожного зразка йшло від ОМ до шва у верхній, центральній та нижній частинах зварного з'єднання. Установлено мікротвердість різних ділянок зварних з'єднань. У досліджуваних зразках №1 та №2 мікротвердість у шві складає 4050...4400 МПа, а для сплаву №3 — 4045...4800 МПа, що приблизно на 15...20% більше, ніж у ЗТВ й ОМ. Це пов'язано з виділенням у шві більш твердої та крихкої  $\alpha'$ -фази.

У роботі проведено механічні випробування зварних з'єднань на міцність та ударну в'язкість. Для випробувань ударної в'язкості було використано зразки Шарпі (10×10×50) з V-подібним надрізом, нанесеним

по осі шва. Для статичних випробувань на розтяг використано стандартні круглі зразки діаметром 6 мм. Усі зразки руйнувалися по основному металу — це говорить про високу якість зварного з'єднання. У табл. 2 наведено механічні властивості зварних з'єднань та основного металу титанових сплавів.

Аналіз отриманих результатів показав, що у всіх титанових сплавах Ti-Si-X механічні характеристики зварного з'єднання складають приблизно 93% від показників основного металу. Високолегований  $\alpha+\beta$ -Ti сплав має максимальну міцність, але при цьому ударна в'язкість нижча, ніж у псевдо- $\alpha$ -Ti сплавах. Найкращі механічні властивості показав сплав №2. Для зварного з'єднання цього сплаву проведено детальні фрактографічні дослідження (рис. 7) та дослідження хімічного складу дисперсних зміцнюючих частинок на приладі JAMP/9500F з використанням двох методів: метод енергодисперсної спектроскопії та оже-спектроскопії (рис. 8).

Фрактографічні дослідження поверхні зламу шва зварного з'єднання №2 після ударних випробувань показали, що руйнування сталося по механізму внутрішньозеренного відколу (крихке руйнування) — див. рис. 7, а. На поверхні зламу чітко виражена спрямованість  $\alpha'$ -фази в зернах при різній орієнтації (див. рис. 7, б). У районі стику трьох зерен спостерігаються фрагменти ямкового характеру руйнування (див. рис. 7, в). Про крихкість руйнування свідчить утворення вторинних тріщин (див. рис. 7, г).

Узагальнений склад дисперсних частинок наближується до алюмініду титану, легуваного цирконієм та кремнієм Ti-Al-Zr-Si (див. рис. 8,

Таблиця 2. Механічні властивості зварних з'єднань та основного металу титанових сплавів №1–3

Номер сплаву	Характеристика зразка	$\sigma_t$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	Ударна в'язкість, Дж/см <sup>2</sup>
1	Основний метал	1106,6	1209,8	8,20
	Зварне з'єднання	985,8	1058,7	6,36
2	Основний метал	1136,5	1271,9	10,14
	Зварне з'єднання	1072,3	1140,1	8,51
3	Основний метал	1329,2	1422,2	4,90
	Зварне з'єднання	1181,2	1293,0	4,80

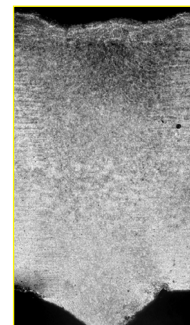
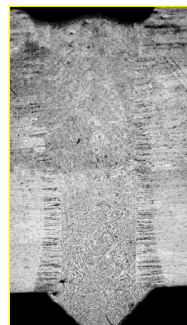
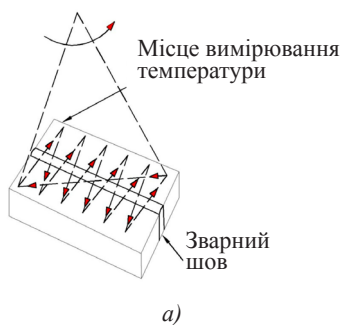


Рис. 6. Схема нагріву електронним променем зони шва та ЗТВ (а) і макроструктура зразка №2 до (б) та після (в) ЛТО

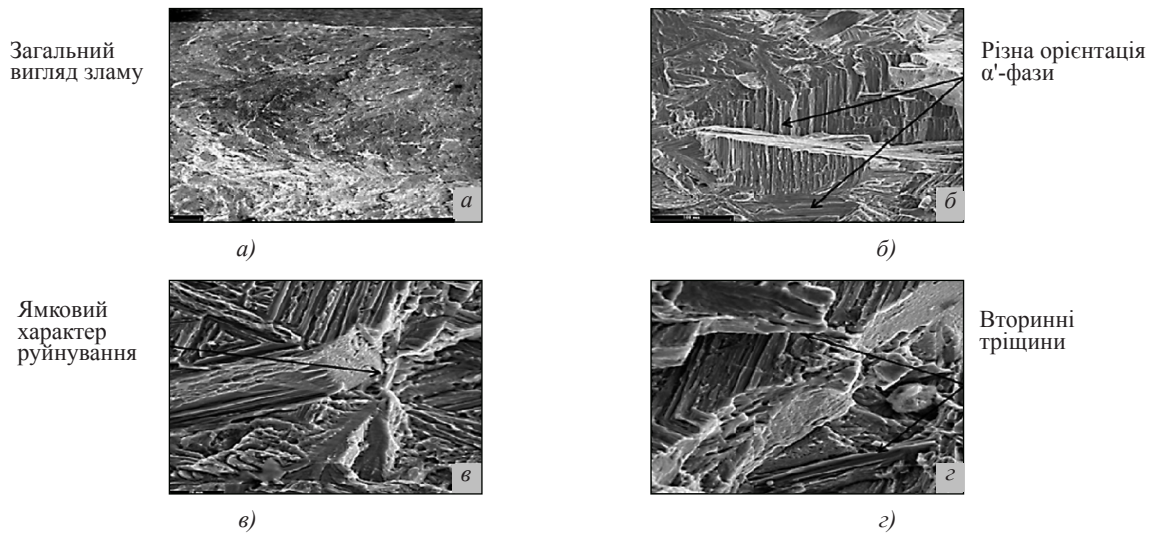


Рис. 7. Фрактографія поверхні зламу шва зварного з'єднання псевдо- $\alpha$ -Ті сплаву №2 після ударних випробувань

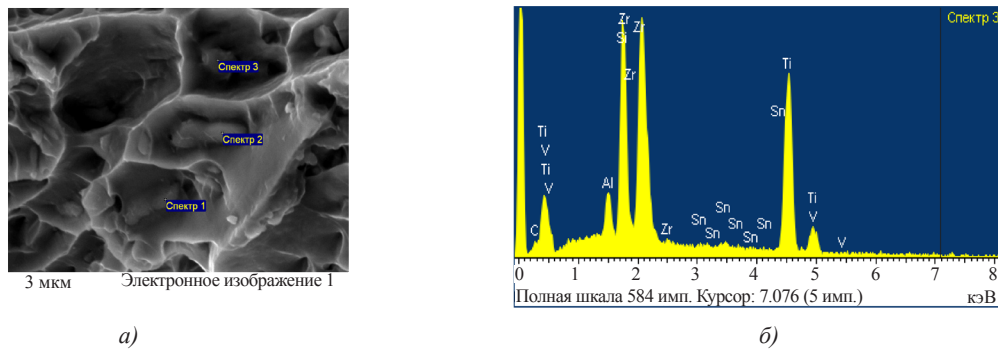


Рис. 8. Зображення поверхні зламу псевдо- $\alpha$ -титанового сплаву №2, виконане у вторинних електронах (а), та аналітичний спектр 3 складу частинок (б)

Таблиця 3. Результати елементного складу фаз (% мас.)

Номер спектра	C	Al	Si	Ti	V	Zr	Sn
Спектр 1	1,77	3,13	8,04	57,00	1,36	26,63	2,07
Спектр 2	2,22	2,15	10,34	48,27	0,46	35,13	1,44
Спектр 3	1,37	1,82	10,37	49,64	1,40	33,78	1,62

табл. 3). Вони хаотично розташовані по поверхні шва та мають розмір 0,1...2,0 мкм. Ці частинки когерентно зв'язані з матрицею і сприяють підвищенню міцності.

**ВИСНОВКИ**

1. Установлено залежність мікротвердості в різних ділянках зварних з'єднань від шва до основного металу. В усіх досліджуваних сплавах мікротвердість металу шва вища, ніж ЗТВ та ОМ за рахунок збільшення кількості дисперсних частинок й утворення  $\alpha'$ -фази, яка має високу міцність та низьку пластичність.

2. Локальна термічна обробка до та після ЕПЗ з охолодженням у печі підвищує структурну однорідність зварного з'єднання, знижує ймовірність утворення в ньому тріщин та сприяє покращенню механічних властивостей псевдо- $\alpha$ -сплаву 2.

3. Установлено, що частинки зміцнюючих фаз когерентні з матрицею, мають розмір 0,1...2,0 мкм, неоднорідний хімічний склад (складні силіциди систем Ti-Al-Zr-Si), рівномірно розподілені по поверхні, підвищують міцність сплавів (до 1422,2 МПа у  $\alpha + \beta$ -сплаві), але не мають позитивного впливу на ударну в'язкість (4,9...8,5 Дж/см<sup>2</sup>).

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

[1] Диаграммы состояния двойных металлических систем [Текст] : справочник : в 3 т. / под общ. ред. Н. П. Лякишева. — М. : Машиностроение, 1999. — Т. 3, кн. 1. — 880 с.

- [2] Дисперсионно-упрочненные титановые сплавы системы Ti-Si-X [Текст] / Г. М. Григоренко, С. В. Ахонин, Т. Г. Таранова [и др.] // Современная электрометаллургия. — 2012. — № 1. — С. 45–52.
- [3] **Каблов, Е. Н.** ВИАМ — сердце авиационной материаловедческой науки [Текст] / Е. Н. Каблов // Вестник воздушного флота. — 2003. — № 4. — С. 6.
- [4] **Хорев, А. В.** Титановые сплавы: применение и перспективы развития [Текст] / А. В. Хорев, М. А. Хорев // Титан. — 2005. — С. 40–53.

---

© Колектив авторів

Надійшла до редколегії 21.11.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК  
д-р техн. наук, проф. *В. Ф. Квасницький*

Статтю розміщено у Віснику НУК № 5, 2012